

周期入力制御による弾性脚を持つ4脚走行ロボットの跳躍姿勢安定制御

著者	志賀 昂, 梶原 秀一, 青柳 学, 花島 直彦
雑誌名	計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集
巻	SI2016
号	第17回
ページ	1553-1556
発行年	2016-12
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009490

周期入力制御による弾性脚を持つ4脚走行ロボットの跳躍姿勢安定制御

○志賀 昂 (室蘭工大), 梶原 秀一 (室蘭工大),
青柳 学 (室蘭工大), 花島 直彦 (室蘭工大)

Hopping Attitude Stabilization of the Quadruped Robot with Compliant Legs by Periodic input control

○Takashi Shiga(Muroran Inst. Tech.), Kajiwara Hidekazu(Muroran Inst. Tech.),
Manabu Aoyagi(Muroran Inst. Tech.) and Naohiko Hanajima(Muroran Inst. Tech.)

Abstract : We are aiming to realize an efficient running motion utilized elasticity of legs by applying the periodic input control method to a quadruped robot with compliant legs. In our previous work, we achieved a hopping locomotion motion by controlling the center of mass of the robot with the expanding periodic input control method. While this approach has an advantage on its simplicity, however it has a disadvantage on stability against disturbances. In this paper, we propose a hopping attitude control based on mutual entrainment among periodic input control systems.

1. はじめに

周期的に振動するメカニカルシステムに対し、周期的な入力をタイミングよく加えることで、制御目的を達成できる場合がある。このようなアプローチとして、我々は周期的に運動するシステムのエネルギーを制御できる周期入力制御法を提案してきた [1][2]。さらに本手法を弾性脚を持つ4脚ロボットに適用し、跳躍移動制御が実現できることを示した [3][4]。これらの研究では多自由度振動系であるロボットの運動のうち、重心の鉛直座標 z のみを対象に周期入力制御法を適用していた。この場合、ロボットの重心の鉛直座標をフィードバックし、重心運動と一定の位相差で同期した周期入力で各脚を制御することにより簡単に跳躍移動制御が実現できたが、ロボットの重心が想定していた場所からずれている、外乱が加わるなどの理由で姿勢角が乱れると、ロボットが意図しない方向に移動あるいは転倒する場合があった。こうした問題を解決するためには、ロボットを多自由度振動系としてモデル化した上で周期入力制御法を適用する必要があると考えられる。そこで我々は、周期入力制御法によりエネルギー制御されたシステム（周期入力制御系）が一種の自励振動系となり、複数結合すると相互引き込み現象が起きていくつかの同期パターンで同期すること [5] に着目した。本研究ではロボットの各脚を1自由度振動系と見なし、それぞれについて周期入力制御系を構築することを考える。この場合、それぞれの系はロボットの胴体を介して相互に結合されていることから、相互引き込み現象が起き、これを利用して各脚の同期制御が可能になると考えられる。本論文では相互引き込み現象を利用して各脚の運動を同相かつ同振幅に維持する制御系を構築し、垂直跳躍時の姿勢を安定化可能かどうかシミュレーションにより検証した結果について述べる。

2. 弾性脚を持つ4脚走行ロボット

本論文で扱う制御対象である4脚走行ロボットのモデルをFig.1に示す。ロボットは前後 (x 軸方向) および左右 (y 軸方向) にそれぞれ対称であり、胴体、4本の1自由度弾性脚、および弾性脚を駆動するアクチュエータで構成される。弾性脚は胴体に対して垂直に取り付けられ、アクチュエータによって脚の軸方向に駆動される。また、弾性脚の質量は胴体と比べて無視できる程度であるとする。

ここで、モデルに関する各パラメータを以下のように定義する。

- m : ロボット胴体質量 [kg]
- W : 弾性脚左右基準間隔 [m]
- D : 弾性脚前後基準間隔 [m]
- l : 弾性脚自然長 [m]
- k : 弾性脚のバネ定数 [N/m]
- c : 弾性脚の粘性減衰係数 [Ns/m]
- μ : 弾性脚と地表面との摩擦係数
- u_i : i 番脚アクチュエータ制御入力 ($i:1-4$) [rad]

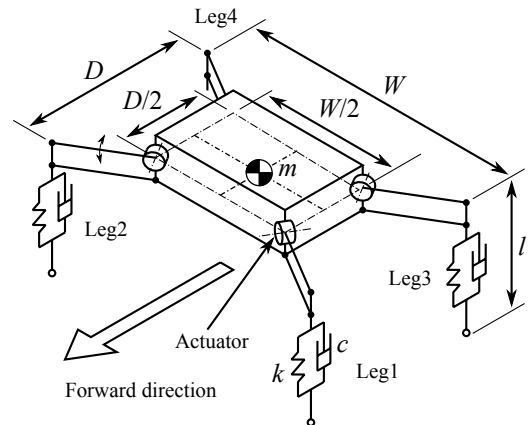


Fig. 1: Model of the hopping robot

また, i 番脚アクチュエータの鉛直座標を肩高さ z_{s_i} と呼ぶことにする. アクチュエータは同一平面に配置されており, ロボットの胴体が水平であるとき $z_{s_1} = z_{s_2} = z_{s_3} = z_{s_4}$ が成り立つ. そこで本研究では, 各 z_{s_i} を同位相かつ同振幅の周期運動に制御することで, ロボットを垂直に跳躍させながら姿勢を水平に保つことを目指す.

3. 周期入力制御法による跳躍制御

3.1 一自由度モデルに基づく周期入力制御

従来の研究 [3][4] で 4 脚ロボットを制御するため用いてきた周期入力制御系のブロック図を Fig.2 に示す. この制御系は, まず重心の鉛直座標 z をフィードバックして重心の運動と同期した信号を得る. 次に, i 番目の脚部アクチュエータに加える制御入力として, 任意の振幅 A をもち, ロボット胴体の鉛直座標 z に対し任意の位相差 ϕ_i を持つ周期信号 u_i を次式のように構成する.

$$u_i = A \left(-\sin \phi_i K_{AG1} \zeta' + \cos \phi_i K_{AG2} \dot{\zeta}' \right) : i = 1-4 \quad (1)$$

ここで, $\zeta', \dot{\zeta}'$ は式 (3) に示す van der Pol(VDP) 方程式の解, K_{AG1}, K_{AG2} はその振幅を 1 に保つオートコントロールゲインである.

VDP 方程式は式 (2) のような微分方程式であり, その周期解 ζ は周期外力 z に対し $\pi/2$ だけ遅れた位相で同期するという特性 (強制引き込み現象) がある.

$$\ddot{\zeta} - \varepsilon (1 - \dot{\zeta}^2) \dot{\zeta} + \Omega^2 \zeta = G_1 z \quad (2)$$

$$\ddot{\zeta}' - \varepsilon (1 - \dot{\zeta}'^2) \dot{\zeta}' + \Omega^2 \zeta' = G_2 \dot{z} \quad (3)$$

($\varepsilon, \Omega, G_1, G_2 > 0$)

ここでは, フィードバックされた重心の鉛直座標 z と同期した信号を得るために強制引き込み現象を利用している. z は交流成分に加えて直流成分を含んでいるため, これを式 (2) に入力して得られる解 ζ も直流成分を含む. しかし $\dot{\zeta}$ は直流成分を持たないため, 式 (3) に $\dot{\zeta}$ を入力して得られる解 $\zeta', \dot{\zeta}'$ は, z と同期し, 直流成分を持たない信号となる. 式 (1) ではこれらを利用して周期信号を構成した.

この制御器は, 式 (1) の位相 ϕ_i によってロボットの運動形態を, 振幅 A によってエネルギーを制御することができる. 本研究では垂直跳躍のみを考えるため, 位相 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \pi/2$ とする. このとき, 重心の位置エネルギーは増加する. また振幅 A は, 制御対象のエネルギー E を目標エネルギー E_d に制御するため次式のように変調する.

$$A = K_p (E_d - E) + K_i \int_0^t (E_d - E) d\tau \quad (4)$$

ただし, エネルギー E は, ロボットの静止時を基準とした位置エネルギーとした.

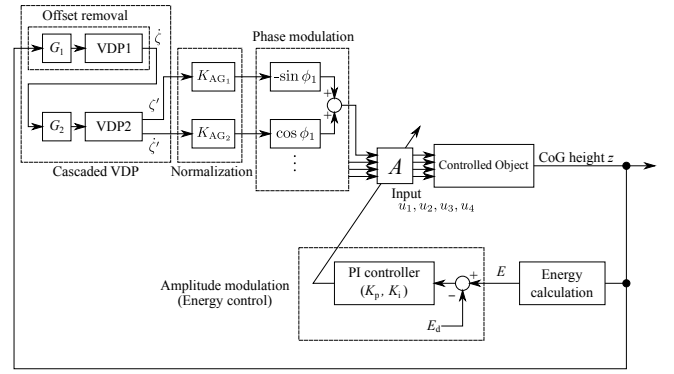


Fig. 2: Control loop based on the 1DoF model

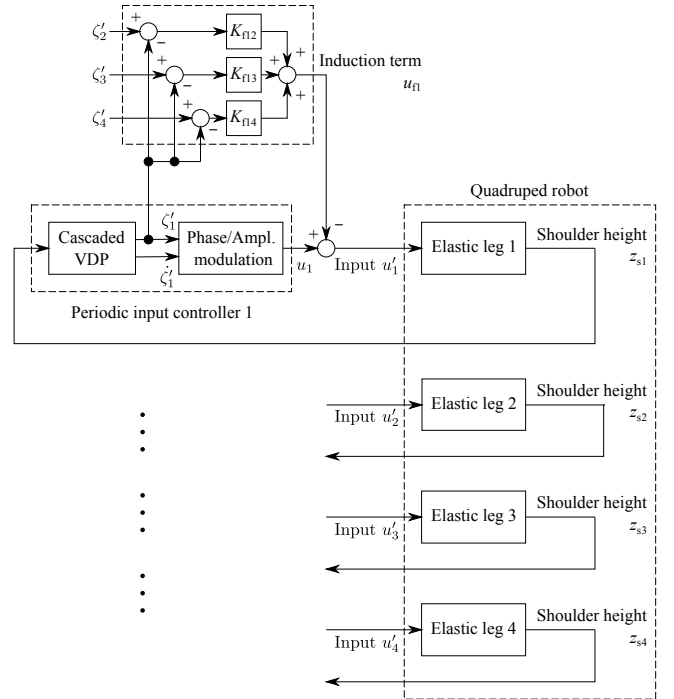


Fig. 3: Control loop based on the 4DoF model

3.2 多自由度モデルに基づく周期入力制御

本研究で提案する制御系のブロック図を Fig.3 に示す. 図中に示した 4 つの Periodic input controller はそれぞれ Fig.2 と同様の制御器である. ただし, それぞれ 1 出力である点と, 制御対象から重心高さ z の代わりに各アクチュエータに対応する肩高さ z_{s_i} をフィードバックしている点が異なる. これらの制御器がそれぞれの弾性脚に対して個別の周期入力制御を行う.

このとき, それぞれの弾性脚を, 胴体によって物理的に相互結合された自励振動系と見なす. 相互に結合された自励振動系は相互引き込み現象により特定の同期パターンで安定することが知られており [5], これを利用することで 4 つの脚を同相に制御できると期待される.

本研究では, 各脚を常に同相で同期させるために同期パ

Table. 1: Parameters of the simulation model

$m = 1.25$	$W = 0.32$	$D = 0.2$
$l = 0.13$	$k = 100$	$c = 0.2$
$\mu = 0.5$		

Table. 2: Parameters of the controller

$K_p = 0.3$	$K_i = 0.2$	$\Omega = 22.0[\text{rad/s}]$
$\varepsilon = 1.0$	$G_1 = 2000$	$G_2 = 100$

ターン制御を行う。 i 番脚に入力される最終的な制御入力 u'_i を次式に示す。

$$u'_i = u_i - u_{f_i} \quad (5)$$

ここで、 u_i は式 (1) と同様の各制御器からの制御入力である。また、 u_{f_i} は 4 つの弾性脚が同期した場合に零となるような誘導項であり、各制御器の VDP 方程式の解 ζ'_i を用いて次式のように構成した。

$$u_{f_i} = \sum_{j=0}^4 \{K_{f_{ij}} (\zeta'_i - \zeta'_j)\} : i = 1-4 \quad (6)$$

ここで、係数 $K_{f_{ij}}$ は対応する脚の位置関係に基づいて別個に設定することとした。本研究では、左右に位置する脚間 (1-2, 3-4) では $K_{f_{ij}} = 0.5$, 前後に位置する脚間 (1-4, 2-3) では $K_{f_{ij}} = 0.1$, 対角に位置する脚間 (1-3, 2-4) では $K_{f_{ij}} = 0.6$ を用いた。

4. シミュレーションによる検証

新たに構成した制御系により、垂直跳躍時に外乱の影響を抑制できるかシミュレーションにより検証した。シミュレーションにおいて用いたモデルのパラメータを Table1 に、制御器のパラメータを Table2 にそれぞれ示す。モデルには定常外乱として、ロボット胴体の前後軸上 $D/2[\text{m}]$ の位置および左右軸上 $W/2[\text{m}]$ の位置にそれぞれ 0.025kg の質量を追加した (Fig.4)。

比較のため、まず従来の制御系 (Fig.2) を用いて、目標高さ 0.16m とする垂直跳躍制御を行った結果について述べる。定常状態における肩高さ z_{s_i} の時間変化を Fig.5a に示す。4 つの肩高さは不揃いであることがわかる。これに伴って、ロボットには振幅 0.035rad ほどのロール振動 (Fig.5b), および振幅 0.045rad ほどのピッチ振動 (Fig.5c) が生じている。こうした振動には Fig.5d に示すような意図しない水平移動を引き起こす問題がある。

次に、本研究で構築した制御系を用いて、目標高さ 0.16m とする垂直跳躍制御を行った結果について述べる。定常状態における肩高さ z_{s_i} の時間変化を Fig.6a に示す。Fig.5a と比べて肩高さのばらつきは小さくなっており、特に波

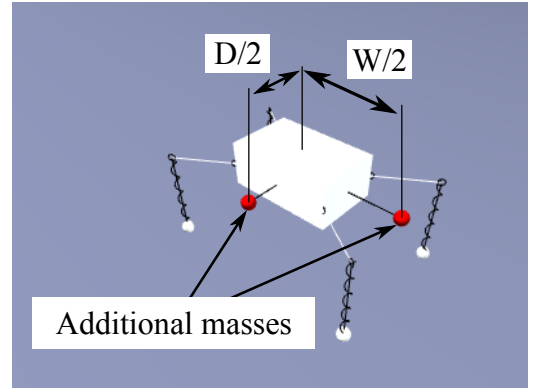


Fig. 4: Additional masses

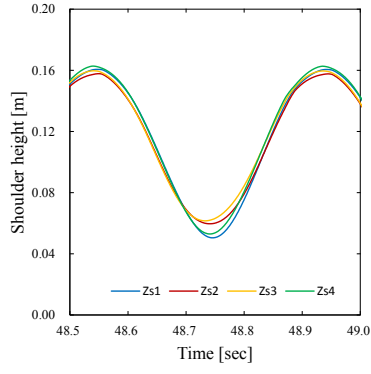
形のピーク付近では 4 つの肩高さがほぼ一致していることがわかる。このときのロール振動を Fig.6b に、ピッチ振動を Fig.6c にそれぞれ示す。特にロール振動の振幅は 0.015rad 程度と従来の制御手法と比べ $1/2$ 程度まで減少しており、顕著な抑制効果が認められる。このときの水平移動は Fig.6d のとおりであり、垂直跳躍時の意図しない移動を従来の制御手法と比べ $1/4$ 程度まで低減できることがわかる。

5. おわりに

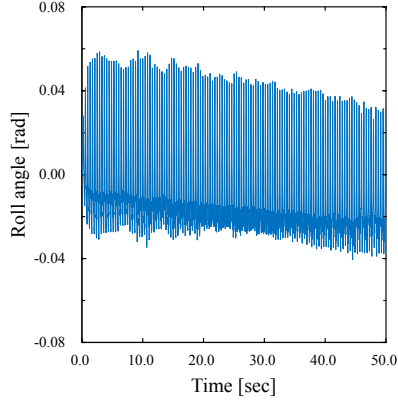
本研究では、弾性脚を有する 4 脚ロボットに対して、それぞれの弾性脚に対して周期入力制御系を構築し、相互引き込み現象を利用して各脚を同位相かつ同振幅に保つ制御系を構築した。シミュレーションによる検証の結果、提案手法により定常外乱の影響を従来の制御手法よりも低減できることがわかった。今後は、各脚間の位相を任意に設定できるよう制御系を拡張し、姿勢安定と跳躍移動を両立する制御手法の実現を目指す。

参考文献

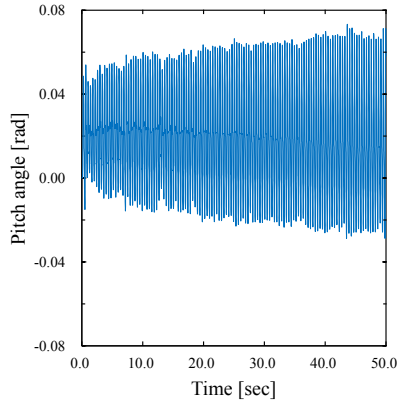
- [1] 梶原, 橋本, 土谷: 周期入力による振り子の運動制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **67**-663, 84/90 (2001)
- [2] 梶原: 周期入力によるホッピングロボットの跳躍高制御, 計測自動制御学会論文集, **49**-5, 537/546 (2013)
- [3] 志賀, 梶原, 青柳: 周期入力制御による弾性脚を持つ 4 脚走行ロボットの跳躍制御, システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 1188/1191 (2015)
- [4] 志賀, 梶原, 青柳, 花島: 周期入力制御による弾性脚を持つ 4 脚ロボットの跳躍移動制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-06b6 (2016)
- [5] 磯嶋, 梶原, 青柳, 花島: 結合周期入力制御系の相互引き込み現象と同期パターン制御, 第 21 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 97/100 (2016)
- [6] 梶原, 花島, 青柳: 引き込み現象を利用した結合 van der Pol 方程式の同期パターン制御—2 または 3 結合 van der Pol 方程式の場合—, 電子情報通信学会論文誌 A, **J98A**-6, 406/416 (2015)



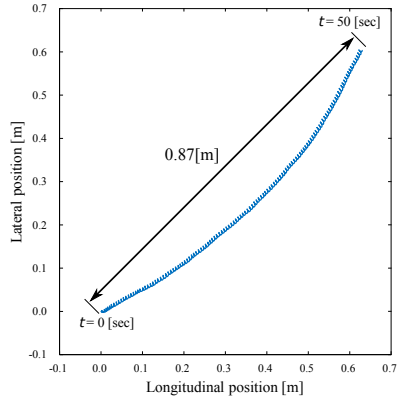
(a) Shoulder height



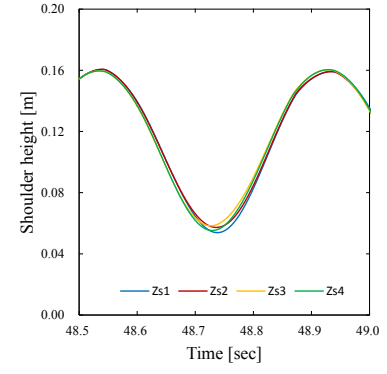
(b) Roll angle



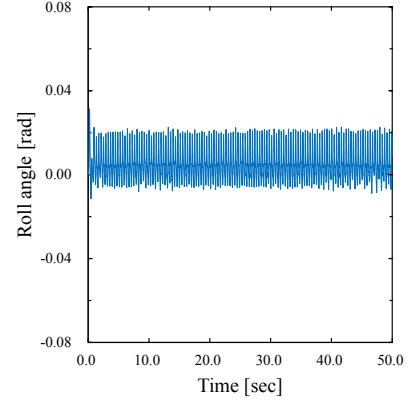
(c) Pitch angle



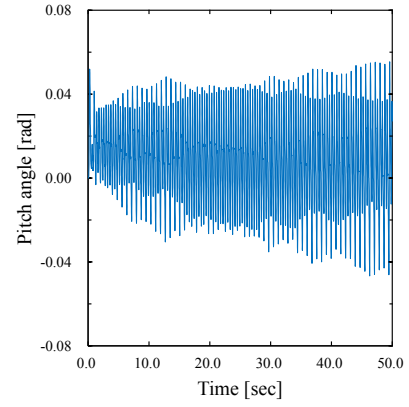
(d) Displacement on x-y plane



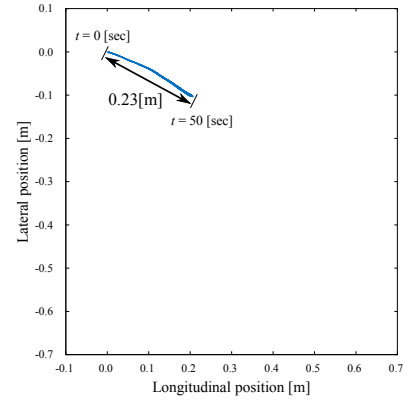
(a) Shoulder height



(b) Roll angle



(c) Pitch angle



(d) Displacement on x-y plane

Fig. 5: Simulation results (Single periodic controller)

Fig. 6: Simulation results (Four periodic controller)